



Simulador de instrumentos de cuerda y su sonido

Especialidad Computación

Autor: *Marc Prat Masó*

Director: *Antonio Susin Sanchez*

Fecha final: 2-10-2018

Abstract

Catala

En aquest treball proposarem un model de renderitzat de so. En ell tractarem de posar-lo en practica. Centra-nos a renderitzar instruments musicals per després poder ser utilitzat en producció musical.

Español

En este trabajo propondremos un modelo de renderizado de sonido. En el trataremos de ponerlo en practica. Centrándonos en renderizar instrumentos musicales para después poder ser utilizados en producción musical.

English

In this project we will try to create a render equation for sound. Then we will try to put on the field. We are going to focus on rendering musical instruments so it could be used in music production.

Reconocimientos y agradecimientos

Antonio Susin Sanchez por su guía y tutela.

Pia Prat Masó por su ayuda en campos de física.

Marcos de St. Germain Canales por sus consejos en ingeniera de sonido.

Índex

I	Introducción	1
1	Formalización del vocabulario	1
2	Evolución histórica	3
3	Motivación	4
II	Objetivo y alcance	5
4	Estado del arte	5
III	Planificación y metodología	6
5	Metodología	6
6	Planificación del proyecto	6
7	Estimaciones del tiempo	7
8	Herramientas y recursos	7
IV	Gestión económica y sostenibilidad	9
9	Autoevaluación sobre la sostenibilidad	9
10	Análisis de la sostenibilidad	9
10.1	Análisis de la sostenibilidad ambiental	9
10.2	Análisis de la sostenibilidad económica	10
10.3	Análisis de la sostenibilidad social	10
11	Presupuestos	11
11.1	Presupuesto en recursos de personal	11
11.2	Presupuesto en material	11
11.3	Presupuesto en licencias	11
11.4	Presupuesto en servicios y otros	12
V	Problema y solución	13

12 Problemas a resolver	13
12.1 Modelo sonoro	13
12.1.1 Parser modelo 3D visual a modelo 3D sonoro	14
12.1.2 Renderizado sonoro	15
12.2 Efecto de resonancia	16
12.3 Observador	17
12.3.1 Pastillas electromagnéticas	17
12.4 Acústicas de una habitación	18
13 Puesto en practica	18
 VI Análisis de resultados	 20
14 Coste computacional	20
15 Análisis sonoro	21
 VII Conclusión	 24
16 Proyectos futuros	24

Part I

Introducción

1 Formalización del vocabulario

Dado que en este proyecto trabajaremos con varios perfiles de profesionales, primeramente formalizaremos el vocabulario técnico del campo de la música para mayor claridad.

- DAW: Digital Audio Workstation, editor de audió.
- MIDI: Musical Instrument Digital Interface. Interfaz digital utilizada para transmitir las diferentes acciones realizables en un instrumento.
- Decibelio: Unidad que se utiliza para expresar la relación entre dos valores de presión sonora, tensión o potencia eléctrica.
- Expresando el *sonido* s como una función continua a lo largo del *tiempo* t . A cada punto de t podemos asignarle unos decibelios a tal que $s(t) = a$.

Dicho esto, explicaremos las diferentes propiedades básicas del sonido:

- Duración: Dominio de la función.
- Timbre teórico: Subconjunto mínimo continuo del dominio del *sonido* s , dando así un conjunto mínimo en el tiempo *timbre* T del sonido s . Éste tiene la propiedad que al largo del dominio del sonido, si agrupamos el tiempo en conjuntos del mismo tamaño que el timbre llamados t_i . Los valores del rango en t_i serán iguales que T escalados por k_i . $\forall t' \in t_i; k_i * s(t') = s(t' \bmod T)$.
- Frecuencia/nota fundamental: Cantidad de veces que se repite el periodo por unidad de tiempo.
- Intensidad: En la función explicada, la intensidad es los máximos de cada periodo.

- ADSR: Función según el tiempo asigna una ganancia igual para todas las frecuencias $ADSR(t) = K$. Las siglas representan en que orden temporal evoluciona.
 - Attack: Principio de la onda la cual aumenta hasta el punto máximo.
 - Decay: Momento álgido de perdida de energía, llegando hasta un punto estable.
 - Sustain: Rango donde la energía se conserva y la amplitud no cambia.
 - Release: Perdida total de la energía llegando a un punto constante donde $ADRS(t) = 0$.
- Como se genera el timbre:

Cuando un cuerpo vibra este no sigue una única periodicidad conocida como frecuencia natural, si no que cada átomo actúa como un punto diferente siguiendo una frecuencia diferente. El sumatorio de todos estos puntos produce que cada frecuencia tenga una amplitud diferente. Donde la mayor de todas es la frecuencia natural y los demás son llamados como armónicos, overtone o modelo.

Los armónicos solamente son aquellos más grandes y suelen seguir un orden. Donde el armónico n^o es n veces la frecuencia natural. Todas las frecuencias en conjunto sin orden, son llamadas overtones y modelo (de forma más técnica/científica).
- Sintetizador: El sintetizador es un instrumento el cual genera de forma artificial o semiartificial sonido. Esta formado por 4 partes:
 - Osciloscopio principal: Utiliza una muestra previa o genera todas las frecuencias armónicas en la misma amplitud.
 - EQ (ecualizador): Función $EQ(f) = k$ cual por cada *frecuencia* f se le asigna un *escalado* k . Después el osciloscopio principal pasa por El resaltado las frecuencias que marca la EQ.
 - Amplificador: Configuración ADSR.
 - oscilador LFO (opcional): Low frequency oscillation, utilizado para otros posibles efectos utilizados.

- **Samplear:** Consiste en una técnica de simulación para teclados y sintetizadores, en que se hace un muestreo de todas las notas de un instrumento con una intensidad constante y después se utilizan las muestras como osciloscopio principal.

2 Evolución histórica

En el 1896 surgió el primer instrumento electrónico el “Telharmonium”, una máquina de 200 toneladas alimentada por 12 máquinas de vapor, capaz de ser tocada a tiempo real. Ese momento fue el inicio de los instrumentos electrónicos o electrófonos, entre ellos el conocido theremin y los sintetizadores.

Desde entonces se ha ido progresando por diversos instrumentos, pero entre ellos el sintetizador ha sido el más extendido por su versatilidad y facilidad a la hora de aprenderlo. En él se ha ido mejorando sus funcionalidades, la capacidad de hacer acordes (polifonía), bancos de memoria, mejor calidad de sonido, sonidos predefinidos, etcétera. Hasta llegar al día de hoy donde con cualquier ordenador y un teclado MIDI simple (por comodidad) puedes componer con una gran variedad de sonidos y efectos.

Una de las técnicas más utilizadas es el sampleo de sonido, uno de los sistemas pioneros fueron las “wavetable” -donde grababan un sonido original y lo dividían en varias partes separando así los diferentes tramos por los que va cambiando el sonido y a posterior personalizar y reproducirlo-. El sampleo se sigue usando con distintas herramientas gracias a su facilidad pero pese a poder modificar su intensidad y frecuencia es muy difícil de cambiar su timbre y por tanto en las replicas se queda acotado a solamente replicar un modelo de instrumento concreto con sus materiales y forma de construcción.

Hoy en día la industria digital se centra sobretodo en tres campos: la edición y producción de audio con DAWs, editores de partituras y editores MIDI; Efectos en forma de hardware o software para modificar sonido entrante en diferentes formatos como pedales, módulos de rack, plugins para instrumentos aumentando el dominio de expresividad de cada instrumento. Y nuevos instrumentos, principalmente, guitarras y sintetizadores tratando de facilitar la creación de sonidos interesantes y a la vez tratando de crear sonidos realistas de instrumentos reales.

3 Motivación

Se estima que la tecnología en la industria musical esta entre una o dos décadas por detrás del resto de tecnologías. Esto empezó a partir del nacimiento del sintetizador (Telharmonium 1897) y los DAWs (Soundstream 1978). Puesto que han sido el foco de trabajo principal. Centrándose en la recreación de sonidos analógicos y en herramientas de edición de audio.

En este trabajo buscamos conseguir una recreación de sonidos analógicos, pero con métodos menos convencionales de la industria, evitando samplear o usar sintetizadores como recurso principal.

Por lo tanto, nuestro objetivo es: mediante métodos numéricos, simulaciones y un acercamiento similar a las técnicas empleadas en gráficos - BRDF, ray tracing, texturas, materias... -. Crear un simulador a nivel teórico y tratar de llevarlo a la practica.

Part II

Objetivo y alcance

El objetivo final del proyecto es crear un modelo de rendering de sonido completo, utilizando métodos numéricos y simulaciones. Además como meta paralela hemos tratado de dejar el código lo mas reutilizable para poder ser adaptado a cualquier plugin o proyecto futuro.

Para tener el modelo tendremos que cumplir 5 simulaciones diferentes y relacionadas: simulador de físicas - tensiones y fuerzas-; rendering y parses de modelos sonoros 3D; simulador de como viaja el sonido por el escenario; efecto de frecuencia natural -vibración por simpatía-; simulador de receptor, en este caso una pastilla electromagnética. Estos problemas los resolveremos mas adelante en la parte V.

De estas capas nos centraremos en resolverás de forma teórica y traeremos a la practica 3 de ellas, parser, vibración por simpatia y receptor. Y las mantendremos lo más genericas para ser configuradas libremente.

Este simulador practico tratara con 3 ficheros de entrada con el objetivo de simular un instrumento. Un modelo 3D visual el cual representara el objeto, un fichero json de configuración que indicara las propiedades de los materiales y un archivo MIDI que según la configuración informara de que zona esta siendo golpeada.

4 Estado del arte

En la producción de audio las diferentes tecnologías se dividen en: tecnología de grabación, deconvolución, manipulación acústica y tecnologías de inmersión. Como vemos la evolución ha desembocado en una aproximación centrada en el sampleo y el sintetizador en el campo de la producción musical. Desde el punto de vista más académico y/o informático, si que podemos encontrar soluciones próximas a nuestra aplicación, pero más centrada en videojuegos, pruebas de sonido de motor y ruidos o sonorización e insonorización de varios tipos. Mientras que en el ámbito de la producción musical, no hay un producto dirigido a músicos y productores si no, lo que se encuentran son herramientas de sintetizador o muestras sampleadas para ser customizadas y reutilizadas.

Visto esto, vemos que actualmente en el mercado no encontramos productos similares a las características de este proyecto, el cual intenta estar en un punto intermedio.

Part III

Planificación y metodología

5 Metodología

La metodología que se ha seguido ha sido circular, enfrentando primariamente a los tres frentes principales propuestos de manera individual y unificándolos al final, Al final de estos se ha visto que es necesario un cuarto punto debido a problemas que explicaremos.

La iteración ciclica consistirá en:

- Resolver el problema: entender desde el punto de vista matemático como se resolvería este problema con los datos conocidos
- Implementar el código: añadir en la cola de módulos el nuevo elemento y asegurar que funciona correctamente
- analizar el resultado: testear y comprobar que el nuevo módulo hace la función que deseamos y nos acercamos más al objetivo global

Los frentes a han sido:

- Planificados desde el principio:
 - Parser de modelo visual a modelo sonoro.
 - Simulación de campos magnéticos y los efectos de elementos metálicos en el.
 - Efecto de resonancia, vibración por simpatía.
- Problemas encontrados:
 - Simulación de perdida de energía en los cuerpos vibrantes.
- Problemas eludidos desde el principio:
 - Raytracing de las ondas de sonido en un escenario.

6 Planificación del proyecto

Como hemos comentado, han surgido problemas que han hecho variar el rumbo del proyecto, y por tanto la planificación ha tenido que escatimarse y cambiar partes. Por otra lado los tiempos hasta el punto actual han sido cumplidos.

7 Estimaciones del tiempo

Estado	Tiempo estimado
Planificación	50h
Análisis y diseño	40h
Establecer el entorno de trabajo	10h
Parser de modelo visual a modelo sonoro	100h
Simulación de campos magnéticos	50h
Efecto de resonancia	50h
Unificación de los simuladores	50h
Creación de una interfaz	50h
Crear modelos y pruebas	10h
Analizar resultados globales	50h
Reconstruir el modelo teórico	50h
Documentación	40h
Total	550h

8 Herramientas y recursos

- Centros de trabajo:
 - Asus R510VX-DM004D
(portatil de trabajo)
 - Altavoces Tascam VL-S3 mediante una interfaz de sonido Line6
Pod Studio GX
 - PC con AMD FX(tm)-6300 y 4GB de RAM DDR3
(pruebas de rendimiento)
- Utilizado para entender los plugins VST:
 - Visual Studio cummunity 2017
 - framework JUICE junto a Makefile
 - minihost Modular
- editores y IDEs:
 - Atom
 - Blender
 - Guitar pro 7
 - Audacity
 - Pro tools
- librerías y herramientas de programación:

- Github Student Developer Pack
 - GNU Compiler Collection (g++)
 - Eigen
 - Midifile
 - Rapidjson
- Documentación y gestión de ficheros:
 - Overleaf
 - Google Drive

Part IV

Gestión económica y sostenibilidad

9 Autoevaluación sobre la sostenibilidad

Después de haber completado el cuestionario, considero que tengo un conocimiento mínimo sobre el tema, donde soy capaz de reconocer la existencia sobre la importancia de los proyectos sostenibles pero no tengo las herramientas necesarias para analizar y colaborar en el con la finalidad de mejorarlo.

Creo que esta falta es debido a la poca practica en proyectos suficientemente grandes y importantes como para que realmente sea palpable y analizable el impacto en la sostenibilidad, o no haber estado en contacto con un proyecto similar y que sea influyente. Además de que las metodologías enseñadas para el proyecto no están enfocadas para estudiantes de mi campo, dado que al final en la practica aplicaré una visión de informático y simplemente tendré un recuerdo ambiguo, dado que es un campo que no lo he experimentado y puesto en practica con suficiente énfasis.

10 Análisis de la sostenibilidad

10.1 Análisis de la sostenibilidad ambiental

Visto que simplemente es un proyecto software el impacto ambiental que puede tener y es se puede cuantificar es el consumo energético que se ha producido en el desarrollo y posteriormente que consumo tendrá en producción. Por tanto calcularemos el consumo energético de ellos:

Estimamos que el proyecto en total son 550 horas, supongamos que al rededor del 75% sera trabajando con el portátil, por tanto tendremos:

$$\begin{aligned} (potencia_{portatil} + potencia_{pantalla} + potencia_{altavoces}) * tiempo = \\ (120w + 23w + 14w) * (550h * 0.75) = \quad (1) \\ 64.762,5Wh \end{aligned}$$

Una vez en producción como aun no tenemos datos suficientes del consumo, nos basaremos en el trabajo de la universidad de nord Carolina. Donde concluyen que el uso de la CPU del simulador en el caso más extremo esta al 50% y de media al 10% de la potencia total. Por tanto un escenario

medio a poder estimar sera la creación completa de un tema, estimando que una tema se suele tardar entre 16/24 horas en crearse desde cero y la herramienta más utilizada es el Mini Mac:

$$\begin{aligned} potencia_{miniMac} * consum_{app} * temps = \\ 85w * (0.5 + 0.1/2) * (2.5 * 8)h = \\ 510Wh/tema \end{aligned} \quad (2)$$

10.2 Análisis de la sostenibilidad económica

Al ser un proyecto sin animo de lucro y con objetivos académico, no se espera ninguna retribución económica. Aun así para satisfacer el objetivo académico, tendremos en cuenta los costes que se han tenido que suplir totalmente de forma personal.

Por otra banda a nivel de cliente, actualmente en el mercado el perfil de clientes que existes, son de gente acostumbrada a un mercado dominado por marcas grandes que garantizan todo lo posible y procuran no ofrecer ningún problema técnico al usuario a cambio de un precio elevado. Por tanto en este proyecto discrepamos un poco por la falta de visibilidad que tendrá. Aun así es una puede ser una herramienta de interés dado que se diferenciaría de la mayoría de productos similares por su flexibilidad y la configurabilidad que tendrá respecto a los otros productos.

10.3 Análisis de la sostenibilidad social

Como este proyecto esta enfocado a ser un merito propio y una contribución como proyecto de código abierto. Espero que este sea un proyecto que genere las bases para poder continuar en el con otras ideas más adelante.

El otro punto de vista, el del actor, es más ambiguo. Aún que un simulador de instrumentos puede ser útil, no garantiza que se utilice.

The Enemy of Art Is the Absence of Limitations
Orson Welles

Tal como dice esta cita de Orswen Welles, una libertad ilimitada de creatividad no garantiza la inspiración en el arte. Y es por este motivo que aún que sea muy practica la aplicación es muy probable que acabe siendo una herramienta más a poder utilizar por curiosidad o diversión que no un instrumento clave como una ecualización o los mismos sintetizadores.

11 Presupuestos

11.1 Presupuesto en recursos de personal

En este proyecto en total han participado 3 personas. El estudiante y los dos profesores. Los profesores han ejercido un rol de consultores de proyecto y consultor técnico ingeniero y el estudiante ha ejercido de programador y jefe de proyecto.

Trabajo	horas	precio / hora estimadas	coste total estimado
Consultor de proyecto	6	19,77	118,59
Jefe de proyecto	50	20	1000
Consultor técnico ingeniero	40	14,83	592.95
Programador software	400	7,5	3000

11.2 Presupuesto en material

Para el entorno de trabajo hemos utilizado el siguiente material:

Producto	precio	vida útil	precio amortizado
Altavozes Tascam VL-S3	99,00	4	24,75
Line6 Pod Studio GX	84,00	4	21
Asus R510VX-DM004D	668,30	4	167,08
BenQ GL2460HM 24"	142,00	8	17,75
PC de sobremesa	517,80	8	64,73

11.3 Presupuesto en licencias

Licencias utilizadas en el proyecto:

Producto	precio	vida útil	precio amortizado
Visual Studio Community 2017	0,00	N/A	0,00
Atom	0,00	N/A	0,00
GNU Compiler Collection (g++)	0,00	N/A	0,00
Eigen	0,00	N/A	0,00
Blender	0,00	N/A	0,00
Overleaf	0,00	N/A	0,00
Google Drive	0,00	N/A	0,00
Github Student Developer Pack	0,00	2 años	0,00
Guitar pro 7	65,00	infinita	0.00
Pro tools first	50,00	infinita	0.00
JUCE	0,00	N/A	0,00
minihost Modular	0,00	N/A	0,00

11.4 Presupuesto en servicios y otros

Otros costes que se han tenido que pagar y servicios utilizados:

Producto	precio	vida útil	precio amortizado
T-jove renfe 2 zonas (2 unidades)	284	6 meses	47,33
Biblioteca publica	0,00	N/A	0,00
Matricula GEP (3 créditos)	118,59	1 mes	118,59
Matricula TFG (15 créditos)	592.95	3 meses	197,65

Part V

Problema y solución

12 Problemas a resolver

El objetivo que nos proponemos en este apartado es agrupar las metodologías necesarias para poder simular el sonido producido y propagado en un escenario. Parte de estos métodos han sido aplicados en nuestro proyecto y otros han sido resultado de los análisis -en el apartado de análisis argumentaremos porque son creemos que son necesarios-. Para ello lo resolveremos según dos posibles observadores: presión atmosférica (oído natural, percepción directa) o por sensores electromagnéticos (pastillas musicales). Para ello nos basamos únicamente de la información dentro del escenario, modelos 3D y propiedades físicas como masa y elasticidad (Modulo de Youngs, amortiguación de fluidos y amortiguación viscoelástica).

12.1 Modelo sonoro

Al igual que la renderización visual necesitamos modelos 3D para representar los objetos sólidos, pero en lugar de asignar colores a cada punto, tendremos que asignar frecuencias. Esto es debido a que según las propiedades físicas y la distribución de los elementos, cada punto de un objeto vibrara con cierta limitación. Por tanto estos elementos no pueden ser elegidos de forma arbitraria y tendrán que calcularse a partir de un modelo 3D y una tabla de materiales y propiedades.

Para hacer este parser, nos hemos basado en el trabajo de la universidad de Nord Carolina[12]. El proyecto de Nord Carolina consiste en convertir el modelo 3D a un sistema de muelles. Donde cada arista es un muelle con masa y elasticidad y los vértices se les asignara una frecuencia según las aristas que estén conectadas a ella.

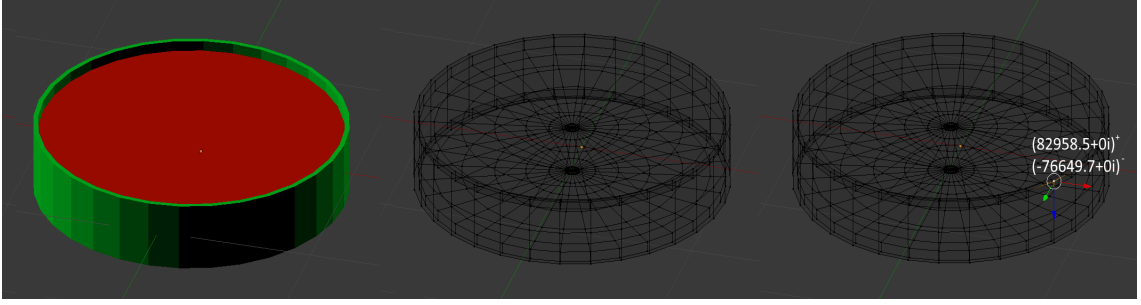


Figura 1: De izquierda a derecha tenemos: El modelo 3D con las propiedades físicas asignadas en forma de materia; la malla de muelles que procesara el programa y un punto con las frecuencias asignadas (solamente de un eje) representadas en el dominio de frecuencias.

12.1.1 Parser modelo 3D visual a modelo 3D sonoro

Para calcular las frecuencias de cada punto, hemos de crear dos estructuras: una que representara la masa de cada punto y otra la elasticidad entre dos puntos. Esta segunda es de $3N \times 3N$ siguiendo la formula (3) explicado en [3].

$$\begin{aligned}
 K_{ij} &= Yt \\
 L &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\
 C_x &= \frac{x_2 - x_1}{L} \quad C_y = \frac{y_2 - y_1}{L} \quad C_z = \frac{z_2 - z_1}{L} \\
 M &= K_{ij} \begin{bmatrix} C_x^2 & C_y C_x & C_z C_x & -C_x^2 & -C_y C_x & -C_z C_x \\ C_x C_y & C_y^2 & C_z C_y & -C_x C_y & -C_y^2 & -C_z C_y \\ C_x C_z & C_z C_z & C_z^2 & -C_x C_z & -C_y C_z & -C_z^2 \\ -C_x^2 & -C_y C_x & -C_z C_x & C_x^2 & C_y C_x & C_z C_x \\ -C_x C_y & -C_y^2 & -C_z C_y & C_x C_y & C_y^2 & C_z C_y \\ -C_x C_z & -C_y C_z & -C_z^2 & C_x C_z & C_y C_z & C_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Donde Y es el modulo de young's del material y t como de ancho es cada arista. Éste método ahorra calcular el volumen de cada punto a cambio de representar un poco peor cada elemento. Hay que tener en cuenta que esta formula es una aplicación en 2 puntos para aplicarlo en una matriz de $N \times N$ hay que aplicar una traslación:

Siendo O la matriz inicial del modelo 3D, K (K_{kl}) la matriz final y M (M_{nm}) la matriz por el calculo de O_{ij} , hay que trasladarla siguiendo el

mapa de traslación (4).

$$\begin{aligned} k &= (\lfloor \frac{n}{3} \rfloor = 0? i * 3 : j * 3) + (n \% 3) \\ l &= (\lfloor \frac{m}{3} \rfloor = 0? i * 3 : j * 3) + (m \% 3) \end{aligned} \quad (4)$$

Por otro lado, la representación de las masas es un vector de tamaño N donde cada punto se calcula con (5) donde ρ es la densidad del material, t sigue siendo la anchura y a_i la área en que participa este punto.

$$\begin{aligned} m_i &= \rho * t * a_i \\ a_i &= \sum_{\forall face \ f \in i} \frac{area_f}{\#vertices_f} \end{aligned} \quad (5)$$

Una vez obtenido esto pasamos a calcular las frecuencias naturales de cada punto donde γ es la amortiguación de fluidos, η la amortiguación viscoelástica y λ_i es el valor propio i^o de la matriz K .

$$w_i^\pm = \frac{-(\gamma\lambda_i + \eta) \pm \sqrt{(\gamma\lambda_i + \eta)^2 - 4\lambda_i}}{2} \quad (6)$$

12.1.2 Renderizado sonoro

En el renderizado de sonido, para tener un sonido completo, hemos de cumplir un mínimo de muestreo. Dado que nuestro oído humano va de 20 Hz a 20 kHz, con tener el doble de la frecuencia máxima tendríamos suficiente, pero por convenio - y otros motivos- en lugar de 40 kHz son 44,1 kHz.

En cada frame o muestra que vamos a tomar, tenemos que calcular cuanta energía contiene cada punto. Para ello usaremos la formula (7), donde g_i es la energía recibida en un punto n^o calculada como $g = G^{-1}f$, f es un vector con todas las fuerzas de entrada por cada punto y dimensión y G^{-1} es una matriz de los vectores propios de K y inicialmente $C_0 = 0$. Hay que tener en cuenta que C se ha de ir actualizando para simular un ADSR.

$$c_{in+1} = c_{in} + \frac{g_i}{m_i * (w_i^+ - w_i^-) * e^{w_i^+ t_0}} \quad (7)$$

Finalmente podemos calcular a que velocidad vibra cada punto en un instante del tiempo. Como δt es muy pequeña entre una muestra y la siguiente, podemos utilizar directamente la velocidad como el diferencial de

posición y así obtener directamente los decibelios en cada momento y por ende el sonido. Por otro lado, podemos optimizar los cálculos utilizando $e^{iw(t+\Delta t)} = e^{iwt}e^{iw\Delta t}$

$$v_i(t) = c_i w_i^+ e^{w_i^+ t} + \bar{c}_i w_i^- e^{w_i^- t} \quad (8)$$

La tabla de materiales la hemos obtenido del trabajo de James F. O'Brien, del cual la Universidad de Nord Carolina baso parte [8]. En el incluye una tabla con algunos materiales básicos y sus propiedades.

Material	Young (Y)	am. fluidos (γ)	Viscoelástica (η)	Densidad (ρ)
Cerámica	3.99×10^9	1×10^{-6}	10	2700
Plástico	2.49×10^{10}	1×10^{-6}	50	2700
Aluminio	4.98×10^{10}	1×10^{-7}	0	2700
Madera	5.00×10^{10}	8×10^{-6}	50	750
Metal	4.99×10^{10}	1×10^{-7}	0	2700

12.2 Efecto de resonancia

En acústica, un efecto muy notorio es el de resonancia. Éste es un efecto producido cuando dos cuerpos con frecuencias naturales están muy cerca y la vibración del primer cuerpo produce la excitación del segundo, haciendo que vibre con el pero en menor intensidad. Un ejemplo claro es el puente de Tacoma Narrows [5] el cual antes de caer por fuertes vientos estuvo un tiempo vibrando en consonancia con ellos.

Por tanto esta interacción entre medios y frecuencias lo tendremos en cuenta. Para esto hemos de saber que proporción obtiene el segundo medio cuando entra en contacto con una frecuencia Ω si su frecuencia es ω , teniendo en cuenta el ancho de banda de resonancia Γ propio del material.

$$I(w) = \frac{1}{(\omega - \Omega)^2 + \frac{\Gamma^2}{2}} \quad (9)$$

Sabiendo el ratio, hemos hecho una aproximación numérica para dar con un calculo aproximado, donde tenemos en cuenta una perdida de energía s (que representa la perdida de energía entre medios) y k es por el desplazamiento. El cual si no sigue recibiendo fuerza externa acabara apagándose.

$$F_R(w) = \max((F_w - (F_w * s) - k), 0) * I(w) \quad (10)$$

12.3 Observador

Al igual que hay diferentes lentes de cámara para el renderizado, podemos tener diferentes percepciones del sonido: más allá de poder acotar o extender el rango sonoro del ser humano, el medio por el cual percibimos el sonido o el mismo sistema de percepción. Por ejemplo, el oído humano cuando escucha dos o mas frecuencias a la vez, escucha tanto la suma de ellas como la diferencia, provocando un tercer tono inexistente llamado el tono de Tartini.

12.3.1 Pastillas electromagnéticas

En este caso, nos centraremos en los observadores electromagnéticos, siguiendo el trabajo de [6] y [7] dado que son unos de los observadores más comunes. Pero un escenario real se suele recibir el mismo sonido a través de diversos observadores y interactuando entre ellos.

Una pastilla electromagnética no es más que un conjunto de imanes envueltos por alambre, creando así varias bobina eléctrica conectadas entre ellas. Cada pastilla eléctrica puede tener varias bobinas, con diferentes materiales, más o menos vueltas en el imán o estar en diferentes posiciones.

Las pastillas eléctricas funcionan por el efecto Faraday: al poner dentro del campo magnético un elemento paramagnetico y moverlo, las bobinas producen una carga inductiva proporcional a la velocidad. Esto unido a la regla de Fleming, vemos que la única dirección que es capaz de detectar es el eje Y.

$$\begin{aligned} B_{punto} &= B_0 \frac{1}{r^2} \hat{r} \\ B_{solenoid} &= \frac{\mu N I}{L} \end{aligned} \tag{11}$$

Visto esto, vemos que podemos calcular el campo inductivo de cada bobina y la inductancia que hay en cada punto. Para ello tenemos que calcular la carga inductiva en cada punto de la cuerda, por cada punto del imán presente en el solenoide. Por tanto utilizaremos la primera formula de (11) integrada por cada punto, sabiendo la regla de Fleming solo calcularemos la inductancia del eje Y por tanto tenemos que hacer la proyección en el eje perpendicular Z. Una vez sabemos la inductancia magnética, podemos

calcular la intensidad producida por el solenoide con la segunda formula.

$$B_z(x', y', z') = \int_0^{2\pi} \int_0^\psi \frac{\sigma(z-z)\rho}{[(x' - [x - \rho \cos(\phi)])^2 + (y' - [y - \rho \sin(\phi)])^2 + (z' - z)^2]^{3/2}} d\rho d\phi \quad (12)$$

12.4 Acústicas de una habitación

Debido a que el sonido tiene mayor rango de longitud de onda que la luz (17mm a 17m vs 390nm a 780nm), las técnicas clásicas de ray-based solo son útiles para las frecuencias altas dado que fenómenos como la difracción se suelen producir en frecuencias bajas. Una solución a esto es aplicar métodos wave-based los cuales se distinguen del ray-based dado que los rayos emitidos tienen grosor.

Por otro lado como el sonido es una propagación de ondas mecánicas, a diferencia de la luz, no podemos estimar que la velocidad es instantánea, y por tanto hemos de tener en cuenta el tiempo por posibles retrasos de sonido provocando así que el problema este en 4 dimensiones y no tres.

Aun así podemos encontrar ecuaciones para renderizar la acústica de habitaciones como [15] [14] los cuales dan un método BRDF para sonido y una ecuación de render, respectivamente, con resultados considerablemente buenos.

Además, podemos optimizar el proceso si los elementos del escenario no suelen moverse o hay pocos, que es exactamente nuestra situación. Utilizando el teorema de Green's hace una base de datos previamente precalculada por todo posible combinación discreta entre la posición del oyente (L) y el origen (S) con ruido blanco ($\vec{g}_v(L, S)$). Después cuando se origina un sonido en la posición de origen $a(S)$ busca la situación más parecida en los datos guardados y aplica dicho resultado como filtro.

$$\vec{v}(L) = \vec{g}_v(L, S) * a(S) \quad (13)$$

13 Puesto en practica

En el proyecto hemos puesto en practica los apartados "12.1", "12.2" y "12.3.1". Bajo la suposición que el apartado "12.1" sea suficiente para producir los armónicos necesarios y suficientemente fuertes para dar un sonido claro y no sea necesario un escenario.

La cadena de calculo es el siguiente:

1. Primero hacemos los precalculos. En el primero calculamos las matrices para el modelo y seguido hacemos producto cruzado utilizando la función de resonancia en una nueva matriz I de todas las frecuencias W . De este modo, tenemos ya la resonancia del cuerpo precalculada también.
2. Seguido empezamos un bucle por todos los eventos del fichero MIDI. Por ahora, estos eventos están en parejas por las instrucciones evento on y evento off correspondientes a cada nota tocada. Dicha nota esta mapeada a un conjunto de fuerzas, codificada en la textura del objeto. Por comodidad esta codificado utilizando las coordenadas: los 3 primeros decimales de la posición "x" representa la nota MIDI codificada entre 13 y 120, mientras que los decimales de las coordenadas "y" son las fuerzas "x", "y" y "z" del punto con dos decimales de expresión.
3. Por cada evento calculamos cada frame (como la tasa de mostré en sonido sin perdidas ha de ser como mínimo 44000muestras/s, en total calcularemos $44000 * tiempo_{nota}$) utilizando la formula (8).
4. Una vez conocida la desviación de cada punto aplicamos la simulación de las pastillas eléctricas por cada punto, y las sumamos entre ellas.
5. Acto seguido calculamos cuanta fuerza sonora recibe cada punto (9). Según las fuerzas de C_i , sumamos el resultado de dichas fuerzas a la matriz de C_i para el siguiente frame.
6. Guardamos los resultados en un vector que representara la amplitud al largo del tiempo y repetimos el proceso.
7. Una vez acabado el bucle, normalizamos los valores para que estén escalados dentro del rango de 13 bits y los guardamos en un fichero wav.

Podéis configurar cuales son los datos de entrada desde el fichero Makefile, indicando que modelo3D utilizareis, que datos JSON y que fichero MIDI y ejecutarlo directamente con un `./Frost-Acre#make`, si el prerender ya esta calculado, y guardado con `./Frost-Acre#make simulate`.

Part VI

Análisis de resultados

14 Coste computacional

Este proyecto consta de dos partes muy distintas. Por una parte esta el precalculo, el cual la mayor parte del coste cae en calcular los valores propios por otra esta la simulación, fácilmente paralelizable dado que cada punto del modelo 3D es independiente.

En la parte de precalculo formamos la matriz de masas, elástica, las frecuencias y las resonancias. En general, todas ellas tienen un tiempo asintótico de $O(\#aristas)$, pero el calculo de las frecuencias incorpora el calculo de valores propios que esta estimado en $O(\#vertices^3)$ además cabe notar que la cantidad de vértices se triplica, una por cada dimensión, y tal como esta implementado el algoritmo no se puede hacer concurrente.

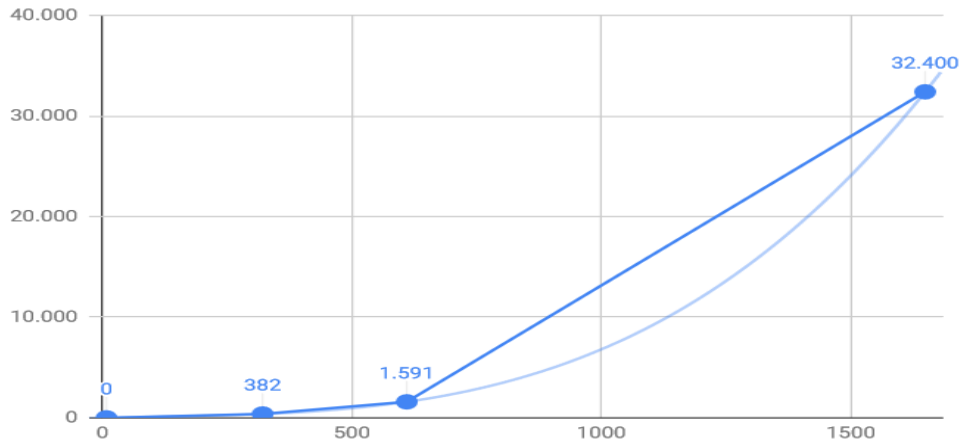


Figura 2: Tiempo de cálculo de la parte de precalculo, en segundos, según la cantidad de vértices del modelo.

Por otro lado la parte de simulación es posible hacerla concurrente y a sido programada paralizando las partes más cercanas a las "hojas". Aun así el tiempo computacional al momento de simular los campos magnéticos y sumar todas las frecuencias lo hace $O(\#vertices * (\frac{\#vertices}{threads}))$.

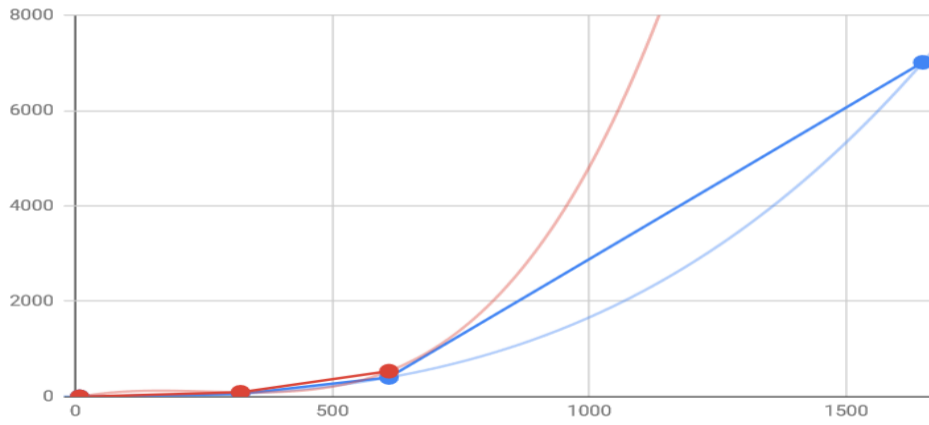


Figura 3: Tiempo de cálculo de la simulación, en segundos, según la cantidad de vértices del modelo. En rojo es linealmente y en azul de modo concurrente con 6 thread.

Un motivo de la ineficiencia obtenida, es el hecho que no hemos probado de optimizar el código tal como hicieron en [12] omitiendo las frecuencias cercanas, dado que el ser humano no es capaz de distinguirlo. Pero esto fue debido dado que las pastillas eléctricas suelen añadir un poco de distorsión, y la distorsión es una función no lineal que cambia parte de las frecuencias.

15 Análisis sonoro

Aquí analizaremos los resultados de los cálculos para ver si el resultado es mínimamente correcto. Primeramente miraremos un resultado habitual como el de la figura 4.

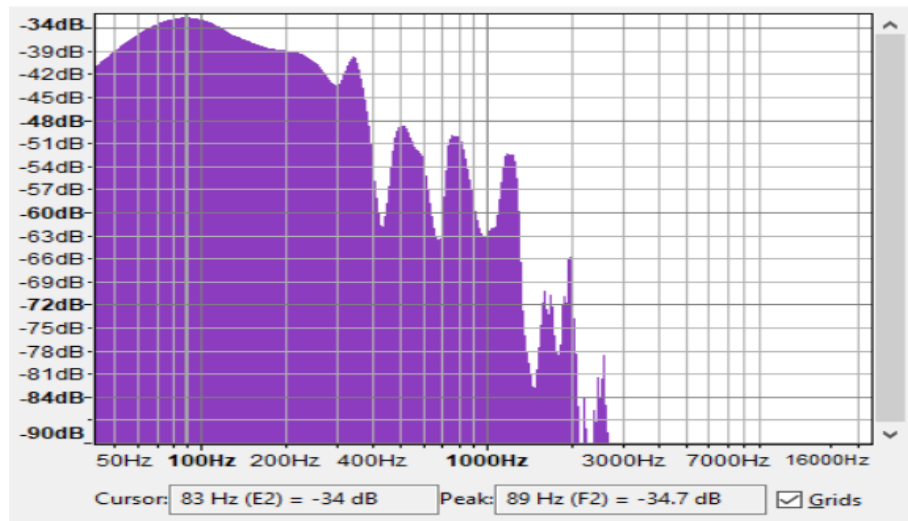


Figura 4: Análisis de frecuencias de un E2 producido por un piano en el RSA del guitar pro7

En este vemos que hay un máximo global más amplio en los 83Hz (que sería el E2) y después encontramos varios máximos locales siguiendo la serie armónica.

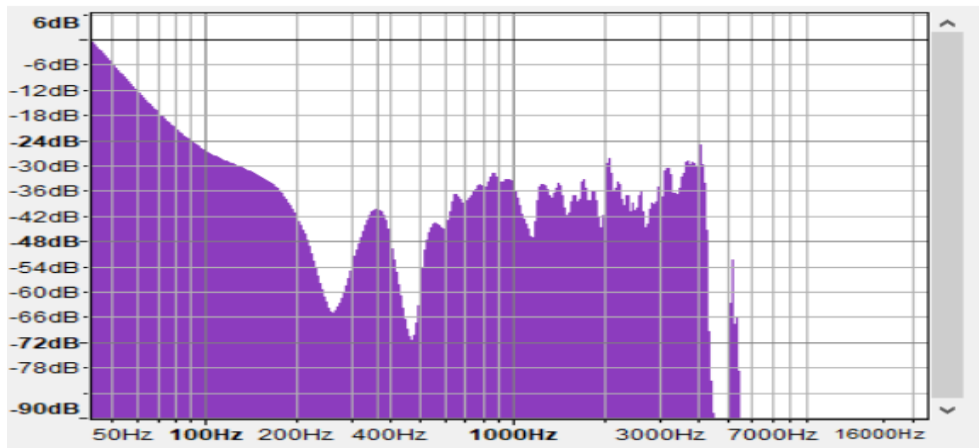


Figura 5: Análisis de frecuencias producido por el modelo steinberger con los datos guitar.json

Ahora veamos el resultado nuestro. A primera vista vemos que no se sigue ninguna serie armónica -ya solo con escucharlo se veía venir-. Pero hay varias cosas más que podemos extraer.

Nota	Frecuencia 12 Temperament	Serie armonica	diferencia entre 12 temperament y la serie armonica	Maximos locales en el espectro Steinberger	Nota más proxima	Frecuencia 12 Temperament	diferencia entre 12 temperament y Steinberger	diferencia entre serie armonica y Steinberger	Rango de error
F#4 (tonica)	369,99	369,99	0	362	F#4	369,99	7,99	7,99	8
				557	C#5	554,37	2,63		
				649	E5	659,25	10,25		
F#5 (2ªarmonico)	739,99	739,98	0,01	773	G5	783,99	10,99	33,02	16
				855	A5	880	25		
				966	B5	987,77	21,77		
C# (3ªarmonico)	1108,73	1109,97	1,24	1252	D#6	1244,51	7,49	142,03	24
F#6 (4ªarmonico)	1479,98	1479,96	0,02	1404	F6	1396,91	7,09	75,96	32
				1575	G6	1567,98	7,02		
				1685	G#6	1661,22	23,78		
A#6 (5ªarmonico)	1864,66	1849,95	14,71	1826	A#6	1864,66	38,66	23,95	38

Figura 6: Máximos obtenidos del espectrograma comparados con la serie armónica mas cercana F#.

Primero veamos cual es el fallo principal. Por un lado no sigue un patrón armónico, pero si que vemos que cubre un amplio rango sonoro y que tiene muchas frecuencias. Por lo tanto, es probable viendo como estamos ejecutando las fuerzas, vemos que realmente las armonías están ahí, pero cubiertas por muchas otras frecuencias. Dado como calculamos las físicas, solo hay un impulso inicial que marca las fuerzas presentes y no es modificando nunca, por lo que no se resaltan las fuerzas más fáciles de vibrar -como unas cuerdas- respecto la madera misma, vibrando afectando a la función ADSR y la EQ natural inexistentes en esta simulación.

Otro problema posible es que no tengamos en cuenta la reverberación y produzca un sonido más seco -como vemos en los resultados de N. Raghuvanshi [12] y los nuestros-. Un ejemplo claro es [1] donde la sensación de hacer explotar un globo varia en gran medida entre una habitación de resonancia y una sin (anecoica).

Part VII

Conclusión

Aunque el proyecto no aya cumplido sus objetivos, considero que el objetivo sigue sin ser una tecnologías tan lejana y con mejores métodos numéricos y adaptando el código a ser ejecutado en GPUs o hardware específico, se podría conseguir mejores tiempos. Además tal como vemos en los resultados de N. Raghuvanshi i M. Lin con un buen motor de físicas y modelos no muy grandes obtenemos los armónicos suficientes para dar un resultado agradable.

Con lo cual, considero que seria los dos puntos que realmente le falta para estar completo: un motor de físicas y importar al código para ser ejecutado por tarjetas gráficas.

16 Proyectos futuros

Un objetivo obvio para el futuro es arreglar lo comentado y rehacer el proyecto con lo aprendido y conseguir así la idea planteada. Dado que hay métodos para paralelizar también el calculo de valores propios [9] se podría obtener un resultado mejor.

Otra solución es plantear un modelo más pequeño a nivel de material, el cual se repita por cada objeto. En otras palabras, en este proyecto hemos unido el modelo y el esquema del material y separado la materia. Pero otra solución seria separar el modelo y tener una base de datos con las materias siguiendo un patrón (aleatorio o no) ya calculado por ejemplo: cristales, fibra de carbono (materiales que describen la composición y el orden). Seguido después de un método para repetir el material como si se tratara de una textura. De esta forma ahorraríamos tiempo en cálculo dado que las matrices de valores propio serian más pequeñas y calcularíamos la fuerza solo en la zona afectada hasta donde se deteriore toda la energía.

Referències

- [1] ECORE Acoustics. *Reverberation time of a balloon pop: reverb room vs. anechoic chamber*. 6-11-2014. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=zq07ZFMvo-c>.
- [2] Apple. *A Brief History of the Synthesize*. 2003. URL: <https://documentation.apple.com/en/logicexpress/instruments/index.html#chapter=A%26section=5%26tasks=true>.
- [3] Dr. George E. Blandford. “Coordinate Transformation Calculations”. A: (2017 11 01).
- [4] M. S. Blanter. *Internal friction in metallic materials*. 2007.
- [5] Castle Films. *Tacoma Narrows Bridge*. 1940. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=nFzu6CNtqec>.
- [6] Valérie Lemarquand Guy Lemarquand. “Calculation Method of Permanent Magnet Pickups for Electric Guitars”. A: (2009).
- [7] N. Horton i T. Moore. “Modeling the magnetic pickup of an electric guitar. American Journal of Physics”. A: (2009), pp.144- 150.
- [8] Christine M. Gatchalian James F. O’Brien Chen Shen. “Synthesizing Sounds from Rigid-Body Simulations”. A: (2002).
- [9] Daniel Kleine-Albers. “Computing eigenvalues in parallel”. A: (13-04-2009).
- [10] Microfusa. *NAMM 2018 microfusa te cuenta lo mas*. URL: <https://www.microfusa.com/magazine/blog/actualidad-novedades-productos-analisis-opiniones/namm-2018-microfusa-te-cuenta-lo-mas>.
- [11] Adam Neely. *I went to NAMM*. 29-1-2018. URL: <https://youtu.be/YfyNhfpLLZ4?t=5m43s>.
- [12] N. Raghuvanshi i M. Lin. “Physically Based Sound Synthesis for Large-Scale Virtual Environments”. A: (2007), pp.14- 18.
- [13] *Resonance*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance>.
- [14] Sami Kiminki Lauri Savioja Samuel Siltanen Tapio Lokki. “The room acoustic rendering equation”. A: *The Journal of the Acoustical Society of America* 122.3 (2007), pàg. 1624- 1635.
- [15] Jaume Durany Vendrell. “Ray Based Simulations for Room Acoustics”. A: (2016).